

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 09-094785

(43)Date of publication of application : 08.04.1997

(51)Int.Cl.

B25J 13/00
B25J 5/00
B62D 57/032

(21)Application number : 07-276487

(71)Applicant : HONDA MOTOR CO LTD

(22)Date of filing : 29.09.1995

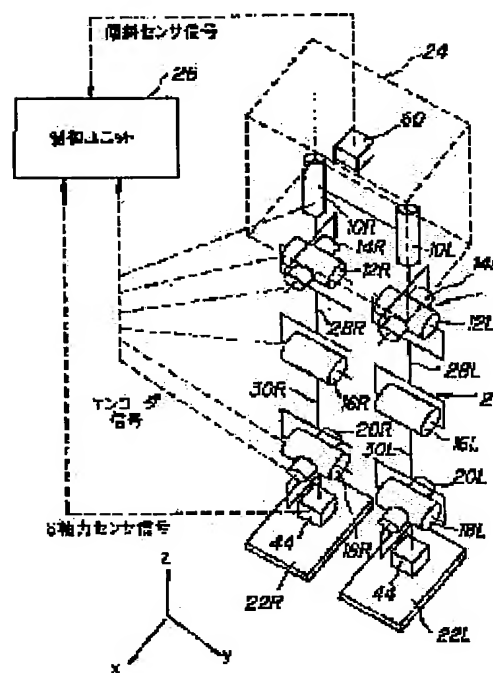
(72)Inventor : TAGAMI KATSUTOSHI
HAIKAWA YUJI

(54) GAIT GENERATING METHOD FOR LEG TYPE WALKING ROBOT

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To quantitatively design an output of an actuator and an action speed and to facilitate generation of a gait by deciding an amplitude for vertical movement of the center of gravity in a robot in compliance with a parameter concerning walking of a robot and generating a gait on the basis of the amplitude.

SOLUTION: Revolute joints 10R, 10L for leg part rotation in a crotch, revolute joints 12R, 12L for the roll direction in the crotch, revolute joints 14R, 14L for the pitch direction in the crotch, revolute joints 16R, 16L for the roll direction in knee parts, revolute joints 18R, 18L for the roll direction in foot parts, and revolute joints 20R, 20L for the pitch direction in the foot parts are individually arranged in this order from the upper sides to the lower sides in respective leg part links 2 on the left side and on the right side. Foot fins 22R, 22L are installed in the foot parts, while a control unit 26 is stored inside an upper body 24 arranged in the uppermost part. In compliance with a parameter concerning walking of a robot, a vertical movement amplitude for the center of gravity of the robot is decided, and on the basis of the amplitude, a gait of the robot is generated.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

27.11.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the
examiner's decision of rejection or application
converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

3405868

[Date of registration]

07.03.2003

[Number of appeal against examiner's decision of
rejection][Date of requesting appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-94785

(43) 公開日 平成9年(1997)4月8日

(51) Int.Cl. ⁸	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
B 2 5 J 13/00			B 2 5 J 13/00	Z
5/00			5/00	E
B 6 2 D 57/032			B 6 2 D 57/02	E

審査請求 未請求 請求項の数 5 F D (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願平7-276487

(22) 出願日 平成7年(1995)9月29日

(71) 出願人 000005326

本田技研工業株式会社

東京都港区南青山二丁目1番1号

(72) 発明者 田上 勝俊

埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社
本田技術研究所内

(72) 発明者 配川 有二

埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社
本田技術研究所内

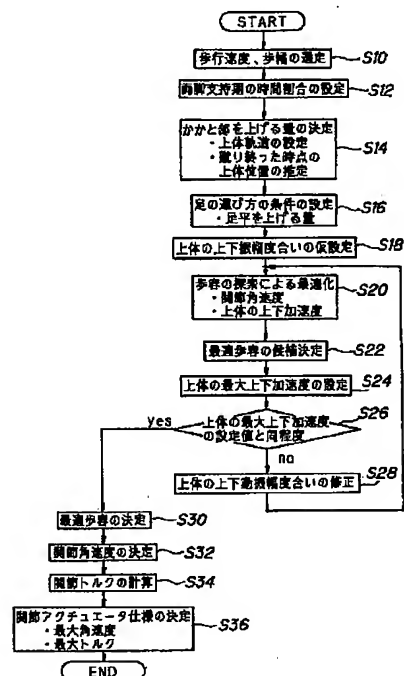
(74) 代理人 弁理士 吉田 豊

(54) 【発明の名称】 脚式歩行ロボットの歩容生成方法

(57) 【要約】

【課題】 物理的な歩行可能条件だけを満足する無数の歩容の中から、アクチュエータの出力や動作速度の定量的設計が可能で、極力無理のない歩行形態を実現する歩容に限定することで歩容生成を容易にする。

【解決手段】 歩行速度の2乗に反比例するようにロボットの重心の上下動の振幅を決定し、それに基づいて歩容を生成する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 少なくとも上体と、前記上体に股関節を介して連結される2本の脚部リンクとを備え、前記2本の脚部リンクがそれぞれ大腿リンクと、前記大腿リンクに膝関節を介して連結される下腿リンクと、前記下腿リンクに足関節を介して連結される足平とからなる、2足歩行の脚式歩行ロボットの歩容生成方法において、前記ロボットの歩行に関するパラメータに応じて前記ロボットの重心の上下動の振幅を決定し、それに基づいて歩容を生成するように構成したことを特徴とする脚式歩行ロボットの歩容生成方法。

【請求項2】 前記ロボットの歩行に関するパラメータが歩行速度であり、その歩行速度が上がるほど前記ロボットの重心の上下動の振幅を小さく決定し、それに基づいて歩容を生成するように構成したことを特徴とする請求項1項記載の脚式歩行ロボットの歩容生成方法。

【請求項3】 前記ロボットの歩行に関するパラメータが歩行速度であり、その歩行速度の2乗に反比例するように前記ロボットの重心の上下動の振幅を決定し、それに基づいて歩容を生成するように構成したことを特徴とする請求項2項記載の脚式歩行ロボットの歩容生成方法。

【請求項4】 前記ロボットの歩行に関するパラメータが歩行速度であり、その歩行速度に応じて前記ロボットの重心の上下動の振幅を決定して上下加速度を所定の値以下に抑制し、それに基づいて歩容を生成するように構成したことを特徴とする請求項1ないし3項のいずれかに記載の脚式歩行ロボットの歩容生成方法。

【請求項5】 前記ロボットの重心が前記ロボットの上体の重心であることを特徴とする請求項1項ないし4項のいずれかに記載の脚式歩行ロボットの歩容生成方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は脚式歩行ロボットの歩容生成方法に関し、より詳しくは、ヒト（人間）並みのサイズを持つ自立型の2足歩行ロボットの関節のアクチュエータを最適に設計するための歩容生成（歩容設計）方法に関する。

【0002】

【従来の技術】従来の2足歩行ロボットは、実用化目的というよりも制御研究を目的としたものがほとんどであり、制御用のコンピュータや動力源としての油圧源や駆動用バッテリーを外部に持つものが大部分であった。サイズの的にも重量的にも小型のものが多く、その結果、床面（接地面）からの衝撃力の緩和やエネルギー効率向上というような実用的観点からみた歩容設計を詳しく検討した例は少なく、物理的な歩行可能条件、例えばZMPが足の接地面内にあるというような理論的な最低条件は満足させるものの、細部の条件はあまり厳密には設計せずに歩行を実現しているものが多い。このような方法で

もロボットが小型軽量であれば大きな問題は起こらない。

【0003】尚、ZMP（Zero Moment Point）は、「歩行のあらゆる瞬間において足底接地点と路面とが形成する支持多角形の辺上あるいはその内側の、ピッチ軸（左右面frontal plane内の軸）およびロール軸（矢状面sagittal plane内の軸）モーメントが零となる点」を意味する。

【0004】実用的観点を含むと思われる従来技術としては、特公平6-88218号公報が提案するものがある。これは、アクチュエータの発生トルクの最適化に着目したものであるが、足平を持つ脚式歩行ロボットに特有の発生トルクの最適化や床面からの衝撃力の緩和まで考慮した最適化に関する検討については記述していない。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、ヒト並みのサイズを持つ自立型の2足歩行ロボットは、重量が通常のヒトのそれよりもかなり大きくなることが多く、床面（接地面）からの衝撃力を緩和しなければ機械強度上の支障となったり、連続稼働時間を延ばすためにエネルギー効率向上が必要になるなどの、実用的システムの成立性において重要な課題が新たに発生する。

【0006】このような条件まで考慮した歩容設計ないし生成は、単に物理的な歩行可能条件、例えばZMPが足の接地面内にあるというような条件を満たすだけでは十分ではなく、アクチュエータの出力や動作速度のようなハードウェア的な条件や床面からの衝撃力を一定レベル以下にさせるとこのような条件を同時に満足させることが必要になる。

【0007】ところが、物理的に歩行可能な歩容は無数にあるが、それらの全てが必ずしも上記した実用的な制約を考慮している訳でない。従って、その中からそのような条件まで満足する歩容を選択して設計するのは容易ではない。まして、様々な分野で利用される2足歩行ロボットはサイズが異なり、歩行速度も均一ではない。そのようなサイズ、歩行速度などで異なる2足歩行ロボットの最適な歩容を設計することは更に困難である。

【0008】しかし、ロボットのアクチュエータの出力や動作速度等を設計する上では、この実際に歩行するときの歩容を考慮せざるを得ない。このために、あらゆる使用形態を考慮して最適な歩容を事前に検討することも原理的には可能であるが、現実には実機による実験を繰り返しながら最適化を進めることが多く、多大な労力と時間が必要になる。

【0009】実用的に妥当な歩容の設計がオフラインにしろリアルタイムにしろ可能になり、更に、ロボットの用途が決定された場合、それを実行するアクチュエータの出力や動作速度の仕様は、その用途の中で最も厳しい条件を満足するように決定することになる。しかし、そ

の場合でも、物理的にもシステムコスト的にも、性能の良いアクチュエータを使用したり、やみくもに機械的強度を増せば良いという訳にはいかない。そのため、極力無理のない歩行形態が望まれるのは、当然である。

【0010】従って、この発明の目的は、実用的な2足歩行ロボットを実現する場合に、複雑な歩容の詳細設計をすることなく、物理的な歩行可能条件だけを満足する無数の歩容の中から、アクチュエータの出力や動作速度の定量的設計が可能で、かつ、実用的に妥当な歩容を限定して歩容生成を容易にする脚式歩行ロボットの歩容生成方法を提供することにある。

【0011】より具体的には、この発明の目的は、実用的な2足歩行ロボットを実現する場合に、物理的な歩行可能条件だけを満足する無数の歩容の中から、アクチュエータの出力や動作速度の定量的設計が可能で、極力無理のない歩行形態を実現して実用ロボットにとって重要な床面からの衝撃力を緩和するような歩容を限定し、よって歩容生成を容易にする脚式歩行ロボットの歩容生成方法を提供することにある。

【0012】

【課題を解決するための手段】請求項1項においては、少なくとも上体と、前記上体に股関節を介して連結される2本の脚部リンクとを備え、前記2本の脚部リンクがそれぞれ大腿リンクと、前記大腿リンクに膝関節を介して連結される下腿リンクと、前記下腿リンクに足関節を介して連結される足平とからなる、2足歩行の脚式歩行ロボットの歩容生成方法において、前記ロボットの歩行に関するパラメータに応じて前記ロボットの重心の上下動の振幅を決定し、それに基づいて歩容を生成する如く構成した。

【0013】請求項2項においては、前記ロボットの歩行に関するパラメータが歩行速度であり、その歩行速度が上がるほど前記ロボットの重心の上下動の振幅を小さく決定し、それに基づいて歩容を生成する如く構成した。

【0014】請求項3項においては、前記ロボットの歩行に関するパラメータが歩行速度であり、その歩行速度の2乗に反比例するように前記ロボットの重心の上下動の振幅を決定し、それに基づいて歩容を生成する如く構成した。

【0015】請求項4項においては、前記ロボットの歩行に関するパラメータが歩行速度であり、その歩行速度に応じて前記ロボットの重心の上下動の振幅を決定して上下加速度を所定の値以下に抑制し、それに基づいて歩容を生成する如く構成した。

【0016】請求項5項においては、前記ロボットの重心が前記ロボットの上体の重心である如く構成した。

【0017】

【作用】請求項1項において、ロボットの歩行に関するパラメータに応じて前記ロボットの重心の上下動の振幅

を決定し、それに基づいて歩容を生成する如く構成したので、歩行速度が上がっても、前記ロボットの重心の上下動の振幅を適切に変更することで、床面からの衝撃力を緩和することができ、広い速度範囲で無理のない歩行形態を実現することができ、歩容の候補をその分絞り込めて歩容設計を大幅に簡略化することができる。

【0018】尚、上記で"ロボットの歩行に関するパラメータ"と記載したのは、ロボットの歩行速度=歩幅×歩調で決定されるため(歩行周期:1歩踏み出す周期)、その3つのパラメータの中で2つ以上であれば、どの組み合わせでも良いためである。但し、請求項2項以降に記載するように、より具体的には歩行速度を意味する。

【0019】

【発明の実施の形態】最初にこの発明に係る歩容生成方法が前提とした2足歩行ロボットを説明する。

【0020】図1はそのロボット1を全体的に示す説明スケルトン図であり、左右それぞれの脚部リンク2に6個の関節を備える(理解の便宜のために各関節をそれを駆動する電動モータで示す)。6個の関節は上から順に、股の脚部回旋用の関節10R、10L(右側をR、左側をLとする。以下同じ)、股のロール方向(y軸まわり。矢状面sagittal plane内の運動)の関節12R、12L、同ピッチ方向(x軸まわり。左右面frontal plane内の運動)の関節14R、14L、膝部のロール方向の関節16R、16L、足部のロール方向の関節18R、18L、同ピッチ方向の関節20R、20Lから構成される。

【0021】足部には足平22R、22Lが装着されると共に、最上位には上体(基体)24が設けられ、その内部に図3に関して後述するマイクロコンピュータからなる制御ユニット26などが格納される。上記において股関節は関節10R(L)、12R(L)、14R(L)から、足関節は関節18R(L)、20R(L)から構成される。また股関節と膝関節とは大腿リンク28R、28L、膝関節と足関節とは下腿リンク30R、30Lで連結される。

【0022】上記の構成により、脚部リンク2は左右の足についてそれぞれ6つの自由度を与えられ、歩行中にこれらの6×2=12個の関節を適宜な角度で駆動することで、足全体に所望の動きを与えることができ、任意に3次元空間を歩行する。

【0023】図2は足部の断面図(矢状面で切断)である。前記した足関節18を駆動する電動モータ(図2で図示省略)の出力はハーモニック減速機(商品名。図2で図示省略)の入力端に入力され、周知の如く適宜な倍率で減速して増力され、下腿リンク30に装着される固定部材32とその下部の回転部材34とを軸線36(足関節18R(L)の軸線と同じ)を中心として歩行進行方向(sagittal plane内)に相対回転(回動)させ、足

平22R(L)をその方向に傾動させる。

【0024】その軸線36と直交する位置には、前記した足関節20を駆動する電動モータ20Mが配置され、その出力は第2のハーモニック減速機40に入力され、前記固定部材32と回転部材34とを第2の軸線42

(足関節20R(L)の軸線と同じ)を中心として進行方向に直交する左右方向(frontal plane内)に相対回転させ、足平22R(L)をその方向に傾動させる。

尚、足関節を含む上記したロボットの構成の詳細は本出願人が先に提案した出願(特開平3-184,782号)などに述べられているので、これ以上の説明は省略する。

【0025】回転部材34の下方には公知の6軸力センサ44が取着され、力の3方向成分 F_x 、 F_y 、 F_z とモーメントの3方向成分 M_x 、 M_y 、 M_z とを測定し、足部の着地の有無ないしは接地荷重などを検出する。6軸力センサ44の下部には、前記した足平22R(L)を構成する、平板状のフレーム46が固定される。フレーム46の下面(足底)は大略平坦に形成され、爪先部46aとかかと部46bには、着地時の衝撃を吸収する弾性体50、52が張りつけられる。

【0026】また、図1に示すロボットにおいて、上体24には傾斜センサ60が設置され、左右面内のz軸(重力方向)に対する傾きとその角速度、同様に矢状面内のz軸に対する傾きとその角速度を検出する。また各関節の電動モータには、その回転量を検出するロータリエンコーダが設けられる。更に、図1では図示を省略するが、ロボット1の適宜な位置には傾斜センサ60の出力を補正するための原点スイッチ62と、フェール対策用のリミットスイッチ64が設けられる。これらの出力は前記した上体24内の制御ユニット26に送られる。

【0027】図3は制御ユニット26の詳細を示すブロック図であり、マイクロ・コンピュータから構成される。そこにおいて傾斜センサ60などの出力はA/D変換器70でデジタル値に変換され、その出力はバス72を介してRAM74に送られる。また各電動モータに隣接して配置されるエンコーダの出力はカウンタ76を介してRAM74内に入力されると共に、原点スイッチなどの出力は波形整形回路78を経て同様にRAM74内に格納される。

【0028】制御ユニット内にはCPUからなる第1、第2の演算装置80、82が設けられており、第1の演算装置80は後述の如く生成されROM84に格納されている歩容パラメータを読み出して目標関節角度を算出し、RAM74に送出する。また第2の演算装置82は後述の如くRAM74からその目標値と検出された実測値とを読み出し、各関節の駆動に必要な制御値を算出してD/A変換器86とサーボアンプを介して各関節を駆動する電動モータに出力する。

【0029】上記のような2足歩行ロボットを前提と

し、以下、この発明に係る歩容生成(歩容設計)方法を説明する。

【0030】1)2足歩行ロボットの歩容設計の一般論
歩容設計では、歩行速度と歩幅と足の運び方と重心の移動のしかたを決める必要がある。

【0031】先に述べた通り、物理的に可能な歩容の制約条件としてZMPを足の接地面内に存在させる必要があることは良く知られている。

【0032】更に、実用的なロボットを開発するためには、関節のアクチュエータの出力や動作速度を適切に設定したり、床面からの衝撃力を小さくしたり、歩行全体のエネルギー効率を高くしたりする配慮が必要である。

【0033】重心を低くした歩行にすると、膝が曲がった歩行になるため、常時大きな保持トルクが必要になる。よって、重心の軌道はできる限り高い方が、エネルギー効率の点からは有利である。つまり、竹馬のように支持点の周りに円弧状に移動して、支持脚を切り替えるのが有利である。

【0034】一方、そのように重心の軌道をあまり高くすると、支持脚が倒れるにつれて必然的に重心が下がるために、重心の上下動が発生する。上下動が大きいと、床面反力の上下成分が増えるので、床面との接地性が悪くなったり、床面からの衝撃力が増加したりする。

【0035】更に、アクチュエータの小型軽量化のためには、アクチュエータの出力を極力小さくする必要があり、そのためには、各関節に要求される最大トルクや最大角速度が極力小さくなるように歩容を設計しなければいけない。実用的な歩容設計では、この相反する条件を考慮しながら妥協点を見つけることになる。

【0036】2)アクチュエータの仕様設計手順
アクチュエータの仕様設計には、最大トルクと最高回転数を決める必要がある。最大トルクなどが決定されれば、それに基づいて最大出力や減速機の要否も含めた仕様を決めることができる。

【0037】最大トルクは歩容によって決まり、厳密には動的に計算すべきだが、歩容と自重から静的な計算を行って概算しても問題ないことが多い。支持脚の股関節の最大角速度は、片足(脚)支持期に次の一步を踏み出さなければいけないことから、歩行速度と片足支持期の長さでほぼ決まる。

【0038】このためには、歩行における歩幅と歩調(歩行周期(ピッチ)、一步踏み出す周期)を決める必要がある。歩行速度が決まっていれば、歩行速度=歩幅×歩調なので、歩幅と歩調の一方を決めれば良いことになる。歩幅は股関節の最大トルクと、歩調は関節の最大角速度と、関係が深い。

【0039】膝関節の最大角速度は、遊脚を床からどの程度上げるかとか、足を早めに出すか遅めに出すかというような遊脚の足平22R(L)の運び方に大きく依存する。

【0040】同様に、足関節18、20R(L)の最大角速度も遊脚の足平の運び方に大きく依存する。また、遊脚の股関節10、12、14R(L)も膝の動きに伴って影響を受ける。そのため、足平22R(L)の運び方の検討、即ち、歩容の設計とその評価が必要になる。設計すべき歩容とは、アクチュエータの性能を最大限に生かした最適なものであることが望ましい。

【0041】その歩容が決定できれば、各関節の最大角速度はその歩容から自動的に決まり、必要なトルクやアクチュエータの最大出力も前に述べたように概算することができるので、アクチュエータの仕様設計が可能になる。

【0042】以下、具体的に説明する。

【0043】3) 歩容の設計手順を含めたアクチュエータの設計手順

上記の如く歩容設計の最終的な目的は関節アクチュエータの仕様を決定し、その歩容によってロボットの機械的強度やアクチュエータ能力を有効に活用してロボットを歩行させることになるが、この発明においてはその関節アクチュエータ仕様の決定までは、図4に示すようになる。以下、同図に沿って説明する。

【0044】ここで説明する歩容の設計手順では、まず最初にS10において歩行速度と歩幅を選定する。

【0045】実際の歩行では、この歩行速度と歩幅は歩行目的によって様々である。また設計者が任意に選定できず、状況から決めなければいけない場合もある。例えば、歩行が困難な場所で歩行速度を上げられなかったり、足平の着地位置が限定されて歩幅が決まってしまうような場合がそれである。

【0046】関節アクチュエータ仕様の決定においては、実際に歩行に使用する可能性のあるものの中で、最も厳しいもの、すなわち最高歩行速度と最大歩幅を選定すれば良い。例えば、最高歩行速度5km/h、最大歩幅750mmというように設定する。

【0047】ヒトの歩行形態に関する研究(例えば「正常歩行における歩調歩幅の歩行パラメータへの影響」、飯田他、整形外科バイオメカニクス、Vol. 5、1983.)によれば、両足(脚)支持期が1歩行期間に占める割合は15%程度であるが、これは、1歩踏み出すのに要する時間の約30%が両足支持期であることを意味する。

【0048】しかしながら、この歩行は、蹴り足の離床時にかかとが垂直付近まで上がるというヒト特有の歩行の特徴に関係している。即ち、2足歩行ロボットは必ずしもヒトと同様の歩行形態をとる必要はない。後で述べる足関節18、20R(L)の動作速度などへの影響を考慮すれば、ヒトよりもかなり少ない約20%程度が実用上望ましいことが実験から分かっている。

【0049】このような事実を踏まえ、S12において両脚支持期の歩行周期に対する時間割合を設定する。

【0050】次にS14に進み、このようにして決まる歩幅と両脚支持期の歩行周期に対する時間割合から、次に両脚支持期の遊脚の離床時の遊脚の足平22R(L)を重力方向に傾動させる、即ち、足平22R(L)のかかと部46bの上げ量を決定し、続いてS16に進んで足平を上げる量などの足の運び方の条件を設定する。

【0051】足平22R(L)の軌道は、その軌道条件の満たす範囲で滑らかな軌道をスプライン関数や、その他の滑らかな曲線を発生させる手段によって生成すれば良いが、いずれにしても、足平22R(L)の軌道では、両脚支持期の支持脚の離床時にかかと部46bを上げる量も重要な歩容のパラメータである。

【0052】このかかと部46bの上げ量を決定する必要性とその方法について以下説明すると、2足歩行ロボットの歩容としては、エネルギー的には遊脚の足平を上げずに床をすりながら歩行することが一番効率が良いが、そのような歩容では実際の歩行路面上に存在する凹凸のような様々な外乱形状に対してつまづきやすくなってしまふ。そのため、状況によって量は変えるが、少なくとも必要最低限は遊脚を上げるのが望ましい。この上げる量は路面の凹凸等の状況次第なので、それに応じた値を適当に設定すれば良い。

【0053】遊脚を高く上げれば膝も大きく曲げることになり、膝関節16R(L)の最大角速度は、当然大きくなる。また関係する股関節10、12、14R(L)の角速度も増大する。よって、実用上考えられる使用条件のなかで一番厳しいものに対して十分となる最小の高さを選ぶことが実用的である。例えば「幅100mm高さ30mmのブロックをまたげるような高さまでは上げる」というような軌道条件を設定すれば良い。

【0054】足平を持たない竹馬のようなロボットもあるように、力学的にはかかと部を上げなくても歩行は可能である。またヒトの歩容では、先に述べたヒトの歩行形態に関する研究にもあるように、かなりの量かかとを上げていることが分かっている。

【0055】ロボットでヒトと同じ歩行形態をとると、足部のかかと部を垂直付近まで上げることになり、可動角度や最大関節角速度が増加して、結果としてアクチュエータ出力の増大につながり設計上は好ましくない。特に、両足支持期の時間が短くなる速い歩行では足関節の角速度が増大して問題となる。

【0056】このような観点からのみ考えると、ロボットによる2足歩行では、かかと部を上げる量を小さくした方が定性的には良い歩容であるといえる。

【0057】ところが、かかと部を全く上げないと、上体の重心軌道が重力方向高さにおいて低い、膝の曲がった歩行形態となることは容易に想像できる。同時に、足を上げる動作においても、両足支持期にかかと部が上がっていない分だけ、足部をより速く引き上げることになり、結果として遊脚の膝を曲げる速さを増大させる場合

もある。

【0058】また2足歩行ロボットの歩容では、上体24の上下動（重力方向の運動）の量も、重要な歩容パラメータである。膝関節16R（L）の屈伸によって脚部リンクの長さは変わるので脚部リンク長などだけでは一意的には決まらない。しかし、例えば「幾何学的に可能な最も高い上体軌道を選択する」などの制約条件によって決定することは可能である。

【0059】上体軌道はそれよりも低ければ、幾何学的には任意に設定できることになる。上体の上下動は着地衝撃などに影響が大きいので、実際にはその振幅を縮小した軌道に設定する。当然、その縮小は上体軌道を下げることで実現することになる。

【0060】4）かかと部を上げる量の適正な範囲の決定

まず、上下G（z方向（重力方向）の変位加速度）を一定値以下に保つという制約条件でかかと部を上げる量を変えながら、上体24の重心軌道の高さがどのように変化していくかの関係を図5に示す。これから、かかと部を上げる量がある角度よりも小さくなると、極端に軌道の高さが低くなることが分かる。これは、かかと部が上がらないため後ろ足が届かず、上体が低くなっていると理解できる。

【0061】このような結果を踏まえて、実施の形態に係る方法では、上体の重心軌道を高く維持するのに十分な量だけ上げるという考え方に基づいて、かかと部を上げる量の適正な範囲を決定することにした。即ち、上体の重心軌道を高く維持した軌道で、歩行時の後ろ足となる蹴り足が上体を支えることができるように、かかと部を上げるようにした。

【0062】この考え方に基づいて決定するために、蹴り終わった時点での上体の位置を予め推定しておく必要がある。即ち、上体24の重心軌道の重力方向高さを所望の値に設定し、蹴り終わった時点の上体24の位置を推定することとする。

【0063】先に述べたように歩行形態は極めて大きな自由度を持っているために、上体の厳密な位置は一意的には決定できない。しかしながら、多数の歩行形態について検討した結果によれば、以下のように簡単に近似計算することができる。

【0064】5）蹴り終わった時点（両脚支持期の最後）での上体の位置の近似計算

ここでは、前記したロボットにおいて、大腿リンク28R（L）と下腿リンク30R（L）の長さを400mmとし、歩行速度1～4km/hとした場合に基づいて説明する。この程度の速度になると静歩行で歩行することはできないことから、完全な動歩行の領域になるので、動歩行における歩行形態の検討には十分である。

【0065】問題を簡単に説明するため、3次元運動をする2足歩行ロボットの左右方向の運動（frontal plan

内の運動）は、この問題にはあまり関係しないので、ここでは考えない。

【0066】また、2足歩行の前後方向の運動（sagittal plane内の運動）においては、足平の加重中心（ZMP）の動かし方も歩行形態に影響を与えてくる。

【0067】通常のヒトの歩行形態での足平の加重中心は、不規則に変動しているとはいえ、平均的には足平の中心付近になっている。図示のロボットも同じにする必要は必ずしもないが、足平の加重中心を、足平22R（L）の幾何学的な中心付近になるようにすれば、外乱に対する復元力の発生余裕を大きくするという効果があるので、実用上は、ロボットにおいても有効な歩行形態と考えられる。

【0068】この実施の形態ではこのように考えて、基本的には、足平22R（L）の幾何学的な中心付近に、より具体的には足関節18、20R（L）の交点（軸線36、42の交点）の投影点より30mm進行方向寄りに足平の加重中心（図2にPで示す）を設定する。尚、凹凸路面や狭い着地点上の歩行のように足平全体を路面に接地させることが困難な場合は、当然この限りではない。

【0069】このような条件で、様々な歩行形態を検討した結果、次のような結果が得られた。

【0070】上体24の重心移動軌跡は、倒立振子としてモデル化されることもあるように、z方向の上下動を伴っている。その結果、上体のx、y方向の移動速度も変動する。通常の歩行では両脚支持期は上体の高さが低くなっており、移動速度は全体の平均歩行速度よりも速くなっている。図6に示すように移動速度の変動は低速歩行で著しく、高速歩行では小さくなる。この実施の形態のロボットの大きさにおいて、2km/hでは約2割、3km/hでは約1割ほど平均歩行速度（等速歩行）よりも速い。

【0071】このロボットの大きさとしては低速歩行といえる1km/hでは7割近くも速くなっている。しかし、低速歩行での極端な速度変動は、静歩行的な歩行形態に近くなるからである。そのような歩行形態の領域では、かかと部を上げる量も静歩行的に設計が可能であり、それが上下Gやエネルギー効率に影響することほとんどないので、この発明による設計手法を適用する必要はない。よって、速度変動が著しく大きくない歩行速度領域においては、上体の平均移動速度である歩行速度で近似できる。

【0072】両脚支持期には、後ろ足から前足に重心が移動していくことになる。図7に、歩行速度1～4km/hにおける両脚支持期の上体24の位置を示す。このときの両足支持期の上体24の位置は、前足と後ろ足の足関節18、20R（L）のほぼ中間点付近にあり、歩行速度との関係も小さいことが分かる。

【0073】更に、この上体の位置について詳しく調べ

ると、支持脚期における足平の加重中心の位置や、蹴り足である後ろ足の足平のかかと部46bを上げる角度に若干依存することが分かる。

【0074】図8に、歩行速度2km/h、歩幅500mmとしたときの、足平22R(L)の加重中心を、足平の幾何学的中心から前後に動かした場合の上体の重心位置の変化を示す。足平の幾何学的な中心は前記の如く、足関節の位置より30mm前方(図2のP点)となっている。加重中心を前に動かした場合には、上体24も前に移動する傾向があることが分かる。上体の位置の移動量は、加重中心を前に動かす量に比例して移動する傾向が読みとれる。しかし、移動量は同じではなく、上体の位置の方が小さい。

【0075】加重中心を前記した点Pに設定した場合には、上体24は、着床時に中間点より50mm手前、離床時に70mm先に移動している。両足支持期の上体24の位置は、平均すれば10mmほど中間点より先にずれていることになる。

【0076】また、かかと部46bを上げる角度でも、上体24の位置は移動する。図9に歩行速度2km/h、歩幅500mmにおける、足平22R(L)のかかと部46bを上げる角度と上体の位置の関係を示す。かかと部を全く上げないものから0.9(rad)上げるものまで検討した結果、かかと部を上げるにつれて、両脚支持期における上体24の位置は後方にずれる傾向があること、および、その量は10mm強であることが分かった。

【0077】この2つの知見から、両脚支持期の終了時点、つまり、後ろ足の離床時点には、上体24は、前足と後ろ足の中間点よりその時の歩行速度で両脚支持期の時間の半分だけ移動したところに到達していると近似しても、その誤差は最大でも前方側に30mm程度で収まることが分かる。

【0078】この誤差は、ロボットの大きさや歩行速度などのパラメータである程度補正することが可能と思われるが、先に述べたようにあまり複雑な補正式ではそのパラメータを定めること自体が困難になり、結果としてアクチュエータを具体的に設計するためには役立たないことが多い。

【0079】このような判断から、両脚支持期の終了時点、つまり、後ろ足の離床時点には、上体は、前足と後ろ足の中間点より、そのときの歩行速度で両脚支持期の時間の半分だけ移動したところに到達していると、単純に近似することが実用的には妥当である。

【0080】6) かかと部を上げる量
このようにして近似的に推定される上体の重心位置に対して、蹴り足が届くようにするためのかかと部を上げるべき最低限の量は、図10に示すように計算するようにした。

【0081】ここで、L：大腿リンク長(L1)と下腿

リンク長(L2)の合計(脚を伸ばした軌道を意味する)、ST：歩幅、PS：両足支持期の時間割合、LT：足関節18、20R(L)の交点の足裏面への投影点から爪先部46bまでの長さ、LA：足平裏底面から足関節18、20R(L)の交点までの長さ、LD：両脚支持期に上体が移動する距離、LH、LP、thA、thB、thC：図10参照、thHmin：かかと部46bを最低限上げる角度、とした場合、以下のようになる。

$$10 \quad 【0082】LD = ST \times PS$$

$$LS = 0.5 \times (ST - LD)$$

$$LH = LA + \sqrt{(L \times L - LS \times LS)}$$

$$LP = ST - LS - LT$$

$$thC = \tan^{-1}(LH/LP)$$

$$thA = \tan^{-1}(LA/LT)$$

$$LB = \sqrt{(LT \times LT + LA \times LA)}$$

$$LX = \sqrt{(LP \times LP + LH \times LH)}$$

$$thB = \cos^{-1}(LB \times LB + LX \times LX - L \times L) / 2.0 / LB / LX$$

$$20 \quad thHmin = \pi - thA - thB - thC$$

【0083】上記において、上体24の重心がそのときの歩行速度で両脚支持期の時間の半分だけ移動した位置(上記LS)に到達するのに必要な、蹴り足のかかと部46bの上げ量thHminを下限値とし、その姿勢となるように歩容を生成する。

【0084】尚、実施の形態に係るロボットのように、足部において爪先部46aが円弧状に反っていると共に、その円弧の半径が小さく、単に先端部に追加された程度なので、近似的にその部分を無視してLTとしても支障ない。

30 【0085】上記について、幾つかの歩幅と両脚支持期の割合について計算した結果を図11に示す。

【0086】また、かかと部46bを上げる量の上限値thHmaxを考えると、上体の重心軌道の重力方向高さを可能な限りを高くするという観点では、図12に示すように、爪先部46aと足関節18R(L)と股関節12R(L)が一直線に並ぶような姿勢以上にかかと部46bを上げて効果がないといえる。よって、
$$thHmax = \pi - thA - thC$$

40 とする。

【0087】かかと部46bを上げる量の上限値と下限値が求まったので、かかと部46bを上げる量の設計値は、原理的にその間にあれば良い。しかし、下限値は上体の重心軌道を所望の高さとするための必要最小量であり、より高く上げれば上体の高さはある程度まで高くすることはできる(図5)。よって、アクチュエータの駆動能力が許せば、それ以上に上げることは大きな問題はない。

【0088】この実施の形態では、下限値からのマージンを確保して、かつ、不必要にかかと部を上げないとい

う観点から、両者の中間値である平均値をかかと部を上げる量の設計値とした。

【0089】7) アクチュエータの設計手順のつづきかかと部の上げ量が決まった後で、S18、S20に進んで歩容の探索による最適化を行う。即ち、S20に進んで関節角速度と上体24の変位加速度(x、y方向における)が最小となるように歩容の最適化を行い、次いでS22に進んで最適歩容の候補を決定する。

【0090】歩容の最適化に先立つ力学的な歩容生成の手法としては、これまでいくつかの方法(例、ロボット学会誌11巻3号「上体の運動によりモーメントを補償する2足歩行ロボット」)が公開されており、それらを応用すれば可能である。この例の文献では、上体の重心位置の高さを一定として遊脚軌道とZMP軌道から歩容を生成する方法が示されているが、膝を曲げないように上体を高くするような滑らかな軌道を設定しても問題はない。軌道設定は、直接軌道を指定しても良いし、別に拘束条件を定めて、遊脚軌道やZMP軌道に従属して決定するようにしても良い。

【0091】S22までの処理で生成された歩容は、その時点では未だ、上体の上下加速度(z方向の変位加速度)の点では着地衝撃力が許容範囲内にあるかなどの条件を満たしているとは限らない。このため、続いてS24に進んで上体の上下加速度の最大値を設定し、上下加速度をその範囲内に押さえることとする。以下説明する。

【0092】8) 歩行速度と上体の上下動の大きさの関係

図1に示す自立型2足歩行ロボット1において、上体24の重さは、ロボット全体の重さの中でもかなりの部分を占め、その上体の重心の上下動の大きさが脚に対する力学的負荷や床面からの衝撃力に直接関係することから、その上体重心軌道の設計は重要な項目である。

【0093】即ち、上下動によって発生する慣性力は、ロボットを支える脚部リンクのアクチュエータへの出力設計に関わるだけでなく、脚部リンクの強度やその力を直接受ける床反力計測用の6軸力センサ44の強度、更には、歩行制御の観点からは床面との接地性にも関係している。この点では、上下動が少ないほうが望ましいが、そうすると上体重心軌道の低いエネルギー効率の悪い歩行形態になる。よって、ある程度の上下動を伴うことになる。

【0094】その場合も脚の負荷を一定レベル以下に抑えるには、上下動を制限する必要がある。上下加速度が1Gを越えなければ原理的にはロボットが床から跳ねることにはないはずであるが、実際には床の凹凸や制御誤差等の影響でそれよりもかなり小さな上下加速度でも接地性が悪くなることがある。図示のロボット上の構造では、実験的には0.2G程度に抑えれば実用上問題ないことが分かった。

【0095】しかし、このレベルに上下加速度を低く抑えることは、歩行形態においては大きな制約となる。よって、上下加速度が問題とならない低速歩行を除いて、主として機械的強度で決まる上下加速度の制限いっぱいまで使う歩行形態が最適な歩行形態となることが多い。そのように、歩行速度によらず上下加速度の制限いっぱいまで使う歩行形態を実現するためには、2足歩行ロボットの歩行速度と上下加速度に関する性質を明らかにする必要がある。

10 【0096】一般的に歩行に伴う上下動の軌道形状が同じならば、上下動の速度は歩行速度に比例して、上下加速度は歩行速度の2乗に比例して増加する。簡単のため上下動の軌道が振幅がAで波長がLの正弦波であると仮定すれば、歩行速度Vで移動する場合の上体の高さHは、

$$H = A \sin(2\pi V/Lt)$$

となる(t:時間)。

【0097】このとき、上下動の加速度DDHはtについて2回微分することによって、

20 $DDH = -A(2\pi V/L)^2 \sin(2\pi V/Lt)$ となる。この式によれば、上下動の加速度DDHは歩行速度Vの2乗に比例することが分かる。

【0098】もちろん実際の上下動の軌道は正弦波ではないが、周期関数なのでフーリエ級数展開が可能であり、その各項の加速度が同様に歩行速度Vの2乗に比例することから、先の仮定のように、歩行速度によらず上下動の軌道形状が完全に同じならば、上下動に伴う上下加速度の大きさは、歩行速度Vの2乗に比例することは明らかである。

30 【0099】ところが、2足歩行ロボットの運動は、運動方程式によって大きな制約を受けており、歩行速度を変えてなお上体の上下動の軌道を完全に同じに保つことは困難である。よって、厳密には歩行速度Vの2乗に比例すると言い切ることはできない。

【0100】工学的にこの性質を用いるためには、その誤差がどの程度かを評価しておく必要がある。多くの条件で歩容を設計して分析した結果、定性的には歩行速度Vの2乗に比例すると近似できることが分かった。

40 【0101】図1のロボットにおいて大腿リンク28R(L)および下腿リンク30R(L)400mm、足関節高さ(前記LA)140mm、自重100kgとし、歩行速度2km/h、3km/h、4km/h、5km/hで、上体24の重心の上下動の振幅を一定(22mm)に保った場合の、上体24の重心軌道と上下加速度のシミュレーションデータを図13から図16に示す。

50 【0102】歩行速度の増大に伴って、上下動の軌道形状は歩行速度によって時間軸が変わるものの、見た目にはかなり類似しており、上下加速度も予想通り増大することが理解できよう。また、歩行速度と最大上下加速度の関係を図17に実線で示す。同図で破線は2km/h

での加速度を基準にして歩行速度の2乗に比例するとした場合の算出値を示すが、その破線との比較から、厳密に歩行速度の2乗に比例しているわけではないが、近似的には成り立っていることが見てとれよう。

【0103】上記の如く、歩行速度を変えることができる2足歩行ロボットでは、上体の上下加速度の要件は、脚強度やセンサ強度などによって決まっており、歩行速度にあまり依存しない。

【0104】このことから、上下加速度の制限いっぱいまで使う歩行形態を実現するためには、上下動の振幅が歩行速度によらず一定で、かつ上下加速度の制限いっぱいとなるように上下動の振幅を決めれば良いことになる。

【0105】即ち、上下動の振幅を歩行速度Vの2乗に反比例させて小さくすることにより実際の上下加速度をほぼ一定とすることができる。この結果、すべての歩行速度で、ロボットの脚強度やセンサ強度などの機械性能を最大限活かした歩行形態を実現することができる。

【0106】上記をより具体的に数値すると、前記した手法に基づいて、大腿リンク、下腿リンク400mm、足関節高さ140mm、自重100kgの2足歩行ロボットが、歩行速度2km/hで、上下加速度2000mm/sec²以下の条件で歩行する歩容が得られる。このときの上下動の振幅は22mmである。

【0107】この歩容を基準に、上体の上下動の振幅を歩行速度の2乗に反比例するように変えて歩容設計を行う。歩行速度3km/hで上下動の振幅22mmを、歩行速度2km/hの歩容の $(2/3)^2 = 4/9$ 倍の9.7mmとした歩容の、ロボット全体の上下加速度を図18に示す。同様に、歩行速度5km/hにおける上下動の振幅を3.5mmとした場合のロボット全体の上下加速度を図19に示す。

【0108】3km/hでは、予想通り上下加速度が抑えられているが、5km/hでは、抑えられているとはいえ、やや上下加速度の増加が見られる。この点を細かく見るために、上体24のみの上下加速度を図20に示す。上体のみの上下加速度をみれば、上下加速度は良く抑えられていることが分かる。つまり、5km/h程度の歩行速度になると、低速歩行では無視することができた脚部リンク（遊脚）の慣性力（Z軸成分）による上下加速度が無視できなくなっていることを意味する。

【0109】しかし、これに対しては当然のことながら上体24の上下動を小さくしても関係ないので、高速歩行が必要な場合には、このような上下加速度の増加要因を考慮してあらかじめ設計強度に余裕を持たせるなどの対策などを併用することになる。このように、上体の上下動の振幅を歩行速度の2乗に反比例させることによって、広い歩行速度の範囲で、ロボット全体の上下加速度による床面からの衝撃力の主要な成分を抑えることができ極端な床面からの衝撃力を緩和することができる。

【0110】より具体的には、上体の最大上下加速度の設定においては、ロボットの力学的強度や歩行路面の剛性、更には、路面との接地性を考慮する必要がある。条件にもよるが、実験的には、 $\pm 2000\text{mm/sec}^2$ 程度ならば路面との接地性は問題にならない。

【0111】図4フロー・チャートの説明に戻ると、S26、S28、S20、S22、S24とループし、先に述べたように上体軌道の上下動の振幅を縮小して軌道について再度歩容生成を行い、最適化する。この結果の上下動が設定値と同程度になれば、それが現実的に歩行可能な最適歩容となる（S30）。

【0112】このようにして最適歩容を決定し、次いでS32に進んで各関節の角速度を、その歩容での関節の動きとして直接的に決定し、S34に進んで関節トルクTを、各時点のZMPの位置ベクトルZと関節アクチュエータの位置ベクトルPと重心運動から決まる床面からの力ベクトルFから

$$T = (P - Z) \times F$$

として決定する。

【0113】関節アクチュエータに必要な最大角速度と最大トルクの仕様がこのように決定できたことから、次いでS36に進んでその最大値を満足する関節アクチュエータの仕様を決定する。

【0114】

【実施例】以下、この発明の実施例を説明する。

【0115】図1に示すロボット1のパラメータは、図21に示す通りとする。また、自重100kg、一步を踏み出す時間の中の両脚支持期の割合（前記したPS）を20%とする。このロボットが移動速度2km/h、歩幅500mmで歩行する場合のかかと部46bを上げる量の決定と、それに基づいた最適歩容によるアクチュエータ仕様の決定方法を、より具体的に、説明する。

【0116】これらのデータを前に述べたかかと部46bを上げる量を求める関係式に適用して、図22フローチャートのS100からS110に示すような手順で、角度の上限値 t_{hHmax} （56.29度）と下限値 t_{hHmin} （9.64度）を求め、その平均値 t_{hH} として32.96度を、かかと部46bを上げる量の設計値とする。

【0117】次に、離床時のかかと部46bを上げる角度を32.96度とする条件で、遊脚軌道を生成する。この軌道は歩行周期の間に滑らかに前に踏み出すような軌道にする。このとき、路面の凹凸へのロバスト性を確保するために遊脚の足平22R（L）をある程度、例えば40mm上げるような軌道を選ぶ。ZMP軌道も力学的条件を考慮して定める。

【0118】具体的には、歩行の安定性を確保するために、基本的にはZMPは足平22R（L）の中央付近にあるように設定し、両足支持期に前方の足平に滑らかに移動するように設定する。両足支持期と片足支持期の移

行の前後ではZMP足平の端点から中央まで滑らかに移動するように移行期間を設ける。上体重心軌道は拘束条件によって極力高く維持するように決定する。

【0119】この条件のもとで、遊脚軌道の探索によってアクチュエータ設計で望ましい関節角速度が極力小さい歩容を先ず求める。このようにして求められた歩容は、まだ、床面の衝撃力等に関する条件である上下加速度の条件を満たしていない。ここでは上下加速度の条件を $\pm 2000 \text{ mm/sec}^2$ としている。この歩容と上体の上下動の軌道と上下加速度を、図23、図24、図25に示す。

【0120】図25から分かるように、上下加速度の条件を越えているので、この歩容に対して上下加速度に対して支配的な影響を与える上体の上下動の振幅が小さくなるような上体軌道の修正を行い、再度歩容を生成する。この結果が図26、図27、図28である。図28によれば、この歩容は上下加速度の条件を満足していることが分かる。

【0121】このようにして、上下加速度まで考慮した歩容を求めることができる。

【0122】この歩容から直接各関節の角速度を求めることができる。この歩容における足関節18R(L)の角速度を図29に、膝関節16R(L)を図30に、股関節12R(L)を図31に示す。次に、先に述べた簡単な計算によって関節トルクを求める。

【0123】この歩容における足関節18R(L)のトルクを図32に、膝関節16R(L)のトルクを図33に、股関節12R(L)のトルクを図34に示す。但し、遊脚を駆動するトルクは計算に入れていない。尚、ロボットの自重を1kgとして規格化した計算値であるので、自重100kgの場合にはこの100倍のトルクが必要である。

【0124】これらの結果から、アクチュエータに必要なとなるの最大角速度と最大トルクは、足関節18R(L)において24rpm、15kgm、膝関節16R(L)において32rpm、17kgm、股関節12R(L)において32rpm、11kgmが必要であることが分かる。

【0125】次いで、上記の如くして生成された歩容に基づいて図示のロボットの歩行を制御する場合について、図35フロー・チャートを参照して簡単に説明する。

【0126】まず、S200で装置各部をイニシャライズしてS202に進み、そこで歩容パラメータを前記したROM84からロードする。前記の如くして生成されたロボットの歩容は、歩容パラメータとしてROM84に記憶される。続いてS204に進んでスタート信号を待機し、スタート信号が生じるとS206に進んでカウンタをインクリメントする。

【0127】続いてS208に進んで姿勢パラメータを

計算する。これは前記した歩容パラメータの中に補間演算を必要とするものがあるため、ここでそれを求め、S206のカウンタで指定される時刻の姿勢パラメータを計算する。続いてS210に進んでそれから12個の関節の角度を計算し、S212に進んで同期信号を待機し、同期が取れたところでS214に進んで算出した関節角度を出力し、S216に進んで歩行終了と判断されない限り、同様の作業を繰り返すと共に、終了と判断されるときはS218に進んでカウンタをリセットして終わる。

【0128】またS214で出力された関節角度に基づき、その関節角度となるように前記した第2の演算装置82においては図36に示すフロー・チャートに従ってサーボ制御が並行的に行われるが、この作業は公知であるので、説明は省略する。

【0129】この実施の形態は上記の如く構成したので、実用的な2足歩行ロボットを実現する場合に、複雑な歩容の詳細設計をすることなく、物理的な歩行可能条件だけを満足する無数の歩容の中から、アクチュエータの出力や動作速度の定量的設計が可能で、かつ、実用的に妥当な歩容を限定することで歩容生成を容易にすることができる。

【0130】具体的には、実用的な2足歩行ロボットを実現する場合に、物理的な歩行可能条件だけを満足する無数の歩容の中から、アクチュエータの出力や動作速度の定量的設計が可能で、極力無理のない歩行形態を実現して実用ロボットにとって重要な床面からの衝撃力を緩和するような歩容を限定し、よって歩容生成を容易にすることができる。

【0131】より具体的には、ロボットの歩行に関するパラメータに応じて前記ロボットの重心の上下動の振幅を決定し、それに基づいて歩容を生成する如く構成したので、歩行速度が上がっても、前記ロボットの重心の上下動の振幅を適切に変更することで、床面からの衝撃力を緩和することができ、広い速度範囲で無理のない歩行形態を実現することができ、歩容の候補をその分絞り込めて歩容設計を大幅に簡略化することができる。

【0132】図37ないし図39は、この発明に係る2足歩行ロボットの歩容生成方法が前提とする2足歩行ロボットの足部の別の例を示す、説明図である。

【0133】図示の如く、足部は平面大略C字状の部材220と、平面大略矩形状の部材222とからなり、C字状部材220と矩形状部材222とはロッド224を介して連結される。即ち、ロッド224はC字状部材220と矩形状部材222に穿設された孔内に挿入され、C字状部材220とはピン226によって固定され、爪先関節を構成する。

【0134】他方、矩形状部材222内に穿設された孔の内径は、ロッド224の外径より比較的大きく形成され、矩形状部材222はロッド224を中心に回転自在

10

20

30

40

50

に構成される。矩形状部材222の中央位置付近には大径の環状孔228が形成され、そこに6軸力センサ44（図示省略）が設置され、その上部に足関節18、20R（L）が連結される。

【0135】そして、ロッド224と矩形状部材222との間にはバネ229が装着され、矩形状部材222を上方（重力方向）に付勢する。従って、足関節18R（L）が軸線36を介して回転すると、矩形状部材はそれに追従して路面から上昇する。この状態で足裏面は、C字状部材220のみが路面に接触する。

【0136】図2に示した足平構造について先に述べたが、図37などに示す足平構造に対しても、爪先部までの長さLTを正確に決定することが困難である場合も考えられる。しかし、その場合でも原則的にはかかと部46bを上げていくときに、等価的にその支点と考えられる長さを使えば問題はない。

【0137】図37などに示す例では爪先関節の回転軸が機構上床面よりも若干上側になるので、厳密にはこの軸までの距離をLTとしては正しくないが、近似的には十分であり、極端な例を除けば、爪先部分を除いた回転軸までの距離をLTとして問題ない。

【0138】尚、かかる近似が成り立たないような足平形状については、その形状の可能性が多岐にわたるため、全ての場合について具体的な手法を表現することはできないが、初めに述べた原則に基づいて、両脚支持期の離床時にあげるべきかかと部の量を収束演算等により計算することにすれば、かかと部を上げる適正量を同様に計算することができる。

【0139】尚、上記において、ロボットの重心を上体のそれで近似したが、ロボット全体の重心を求めても良いことは言うまでもない。

【0140】尚、上記において、2足歩行脚式移動ロボットの例のみ示したが、上記した構成は3足以上の脚式移動ロボットにおいても原理的には妥当する。

【0141】

【発明の効果】ロボットの歩行に関するパラメータに応じて前記ロボットの重心の上下動の振幅を決定し、それに基づいて歩容を生成する如く構成したので、歩行速度が上がっても、前記ロボットの重心の上下動の振幅を適切に変更することで、床面からの衝撃力を緩和することができ、広い速度範囲で無理のない歩行形態を実現することができ、歩容の候補をその分絞り込めて歩容設計を大幅に簡略化することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明に係る脚式歩行ロボットの歩容生成方法が前提とする2足歩行ロボットを全体的に示すスケルトン図である。

【図2】図1に示す2足歩行ロボットの足平の構造を詳細に示す説明断面図である。

【図3】図1に示す2足歩行ロボットの制御ユニットの

詳細を示すブロック図である。

【図4】図1に示す2足歩行ロボットを前提に、この発明に係る歩容生成方法を示すフロー・チャートである。

【図5】図1に示すロボットが上下Gを一定値以下に保つという制約条件でかかと部を上げる量を変えながら、上体の重心軌道の高さがどのように変化していくかの関係を示すデータ図である。

【図6】図1に示すロボットの歩行速度に対する両脚支持期の上体の移動量を示すデータ図である。

【図7】図1に示すロボットの歩行速度に対する両脚支持期の上体の位置を示すデータ図である。

【図8】図1に示すロボットの足平の加重中心（ZMP）を足平の幾何学中心から前後に動かした場合の上体の位置の変化を示すデータ図である。

【図9】図1に示すロボットのかかと部の上げ量に対する上体の位置の関係を示すデータ図である。

【図10】図1に示すロボットについてかかと部の上げ量の下限値の算出を示す説明図である。

【図11】図1に示すロボットについて歩幅に対するかかと部上げ量の関係を示すデータ図である。

【図12】図1に示すロボットについてかかと部の上げ量の上限値の算出を示す説明図である。

【図13】図1に示すロボットについて歩行速度2 km/hでの上体の上下動の振幅を一定に保った場合の上体の重心軌道と上下加速度の関係を示すデータ図である。

【図14】図1に示すロボットについて歩行速度3 km/hでの上体の上下動の振幅を一定に保った場合の上体の重心軌道と上下加速度の関係を示すデータ図である。

【図15】図1に示すロボットについて歩行速度4 km/hでの上体の上下動の振幅を一定に保った場合の上体の重心軌道と上下加速度の関係を示すデータ図である。

【図16】図1に示すロボットについて歩行速度5 km/hでの上体の上下動の振幅を一定に保った場合の上体の重心軌道と上下加速度の関係を示すデータ図である。

【図17】図1に示すロボットについて歩行速度に対する上下加速度の関係を示すデータ図である。

【図18】図1に示すロボットについて歩行速度3 km/hのときの上下動の振幅を歩行速度の2乗に反比例させて変えた場合の上下加速度を示すデータ図である。

【図19】図18と同様のデータ図で歩行速度5 km/hのときの上下加速度を示すデータ図である。

【図20】図18と同様のデータ図で歩行速度5 km/hのときの上体のみの加速度を示すデータ図である。

【図21】この発明の実施例で用いる、図1のロボットのパラメータの説明図である。

【図22】この発明の実施例における、かかと部の上げ角度の算出を示すフロー・チャートである。

【図23】図22フロー・チャートで算出された歩容を示すシミュレーションデータ図である。

【図24】図23に示す歩容の上体の上下動の軌跡を示

すデータ図である。

【図25】図23に示す歩容の上体の上下加速度を示すデータ図である。

【図26】図23に示す歩容の修正例を示すシミュレーションデータ図である。

【図27】図26に示す歩容の上体の上下動の軌跡を示すデータ図である。

【図28】図26に示す歩容の上体の上下加速度を示すシミュレーションデータ図である。

【図29】図26の歩容から求められる足関節の角速度を示すシミュレーションデータ図である。

【図30】図26の歩容から求められる膝関節の角速度を示すシミュレーションデータ図である。

【図31】図26の歩容から求められる股関節の角速度を示すシミュレーションデータ図である。

【図32】図26の歩容から求められる足関節の関節トルクを示すシミュレーションデータ図である。

【図33】図26の歩容から求められる膝関節の関節トルクを示すシミュレーションデータ図である。

【図34】図26の歩容から求められる股関節の関節トルクを示すシミュレーションデータ図である。

10

20

*

*【図35】この実施の形態に係る歩容生成方法で生成された歩容に基づいて図1のロボットの歩行を制御する例を示すフロー・チャートである。

【図36】図35の制御における関節角度のサーボ制御を行う例を示すフロー・チャートである。

【図37】この発明に係る歩容生成方法で前提とする2足歩行のロボットの別の例を示す足平の説明断面図である。

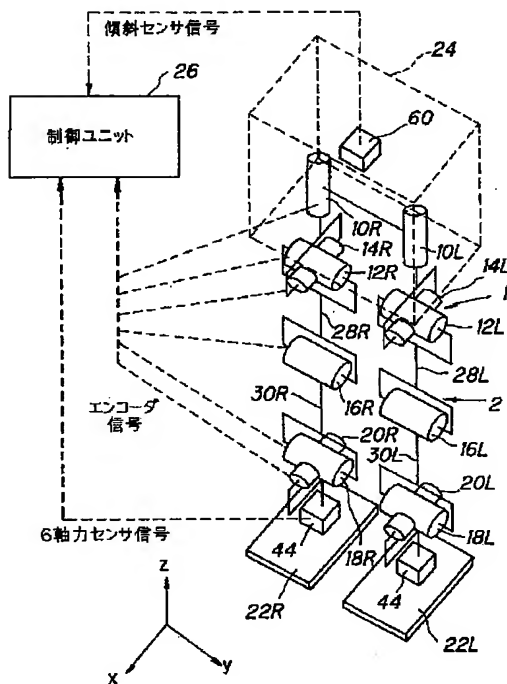
【図38】図37のXXXXVII I-XXXXVII I線断面図である。

【図39】図37の足平のかかと部を上げた場合を示す説明側面図である。

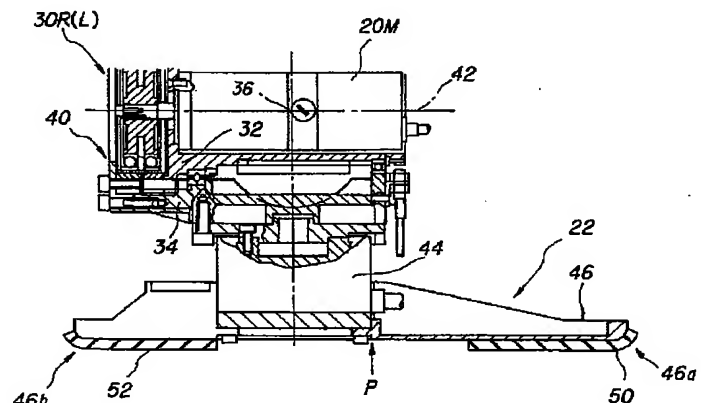
【符号の説明】

1	ロボット
2	脚部リンク
10, 12, 14R, L	股関節
16R, L	膝関節
18, 20R, L	足関節
22R, L	足平
46b	かかと部

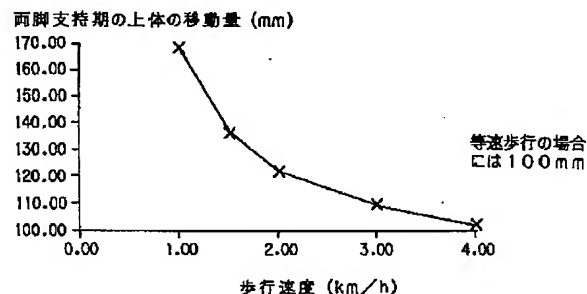
【図1】



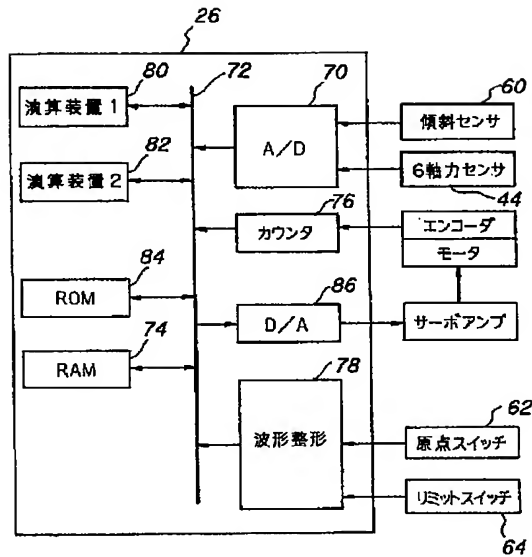
【図2】



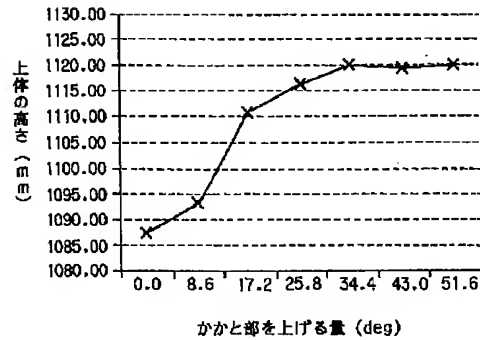
【図6】



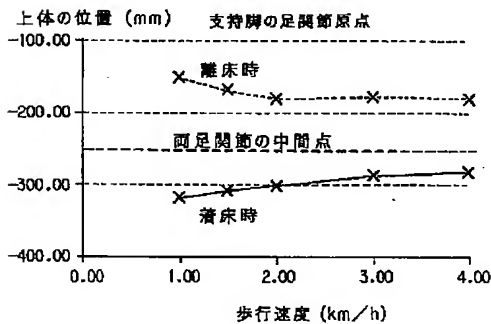
【図3】



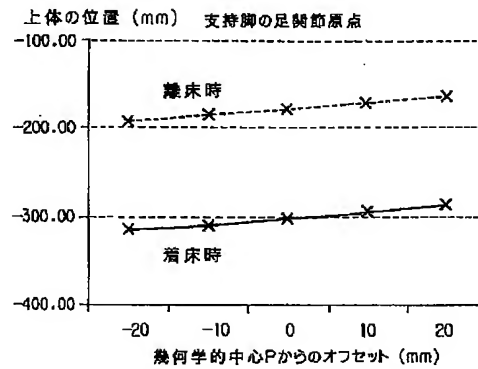
【図5】



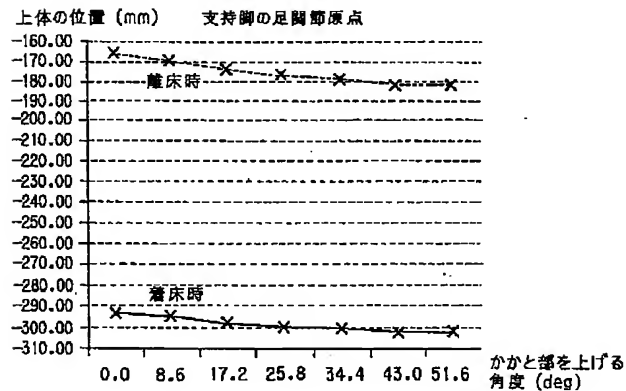
【図7】



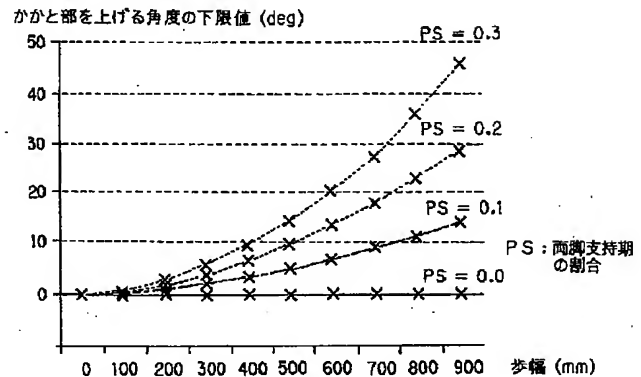
【図8】



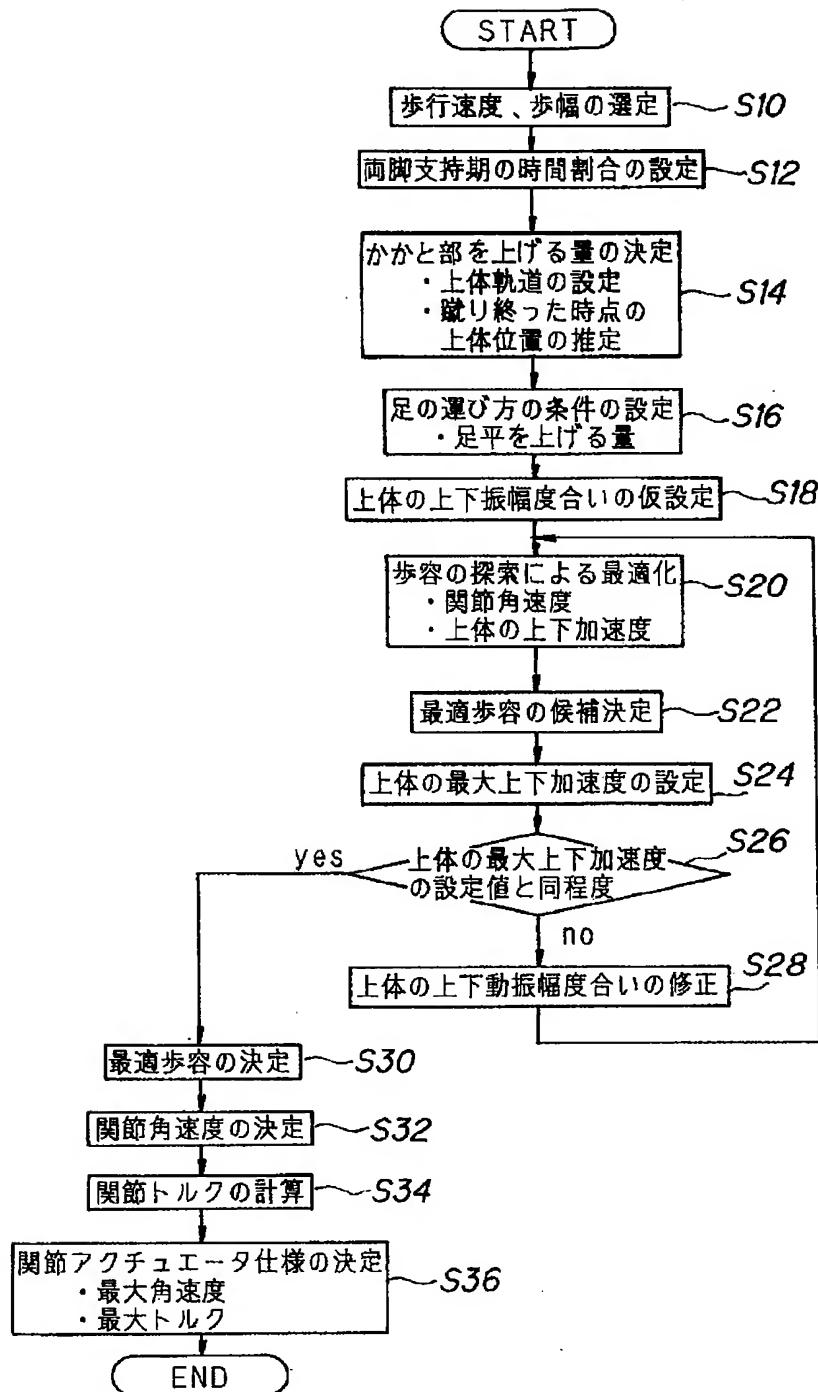
【図9】



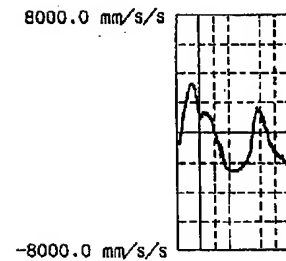
【図11】



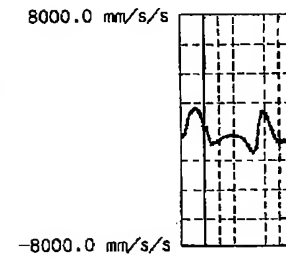
【図4】



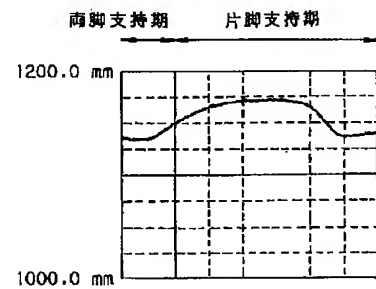
【図19】



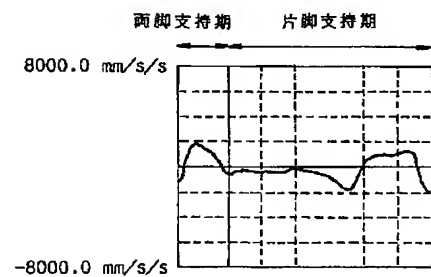
【図20】



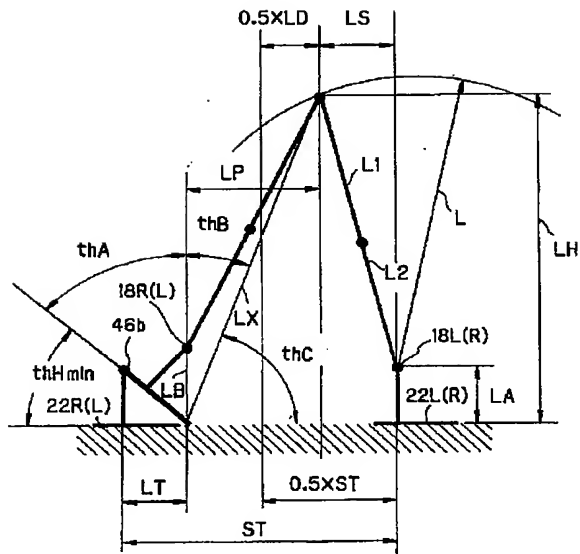
【図24】



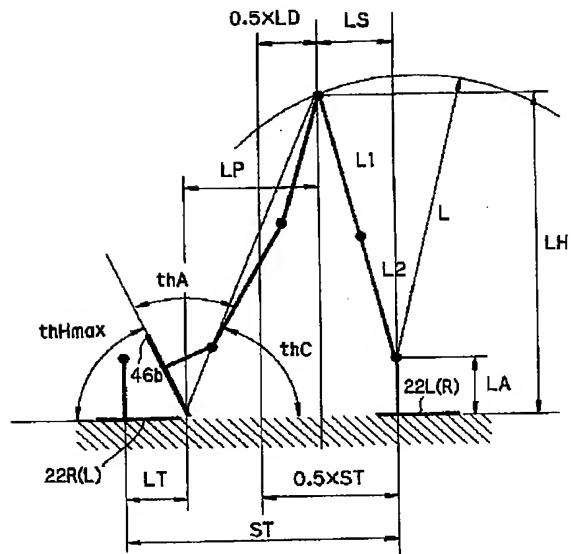
【図28】



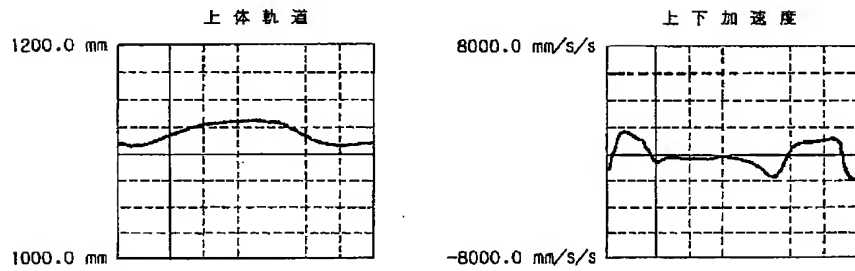
【図10】



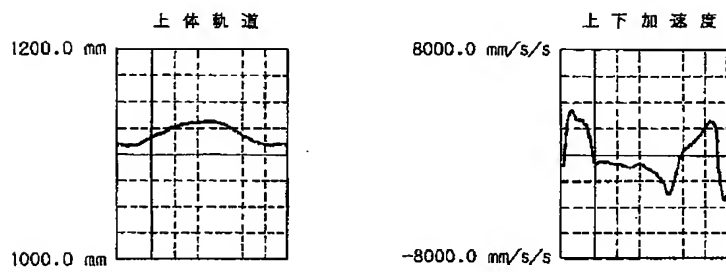
【図12】



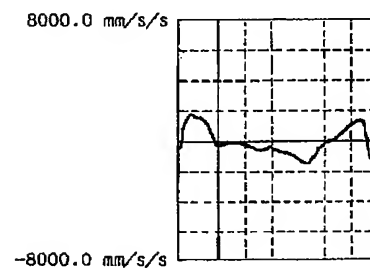
【図13】



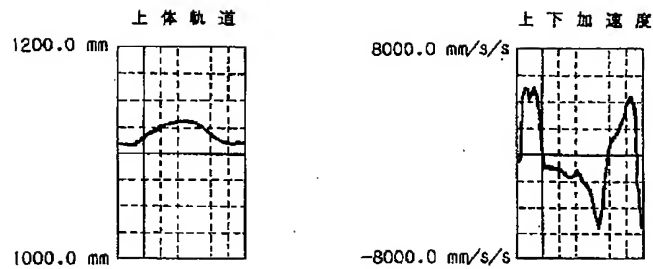
【図14】



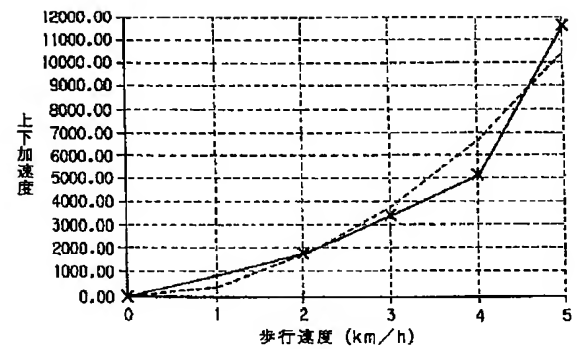
【図18】



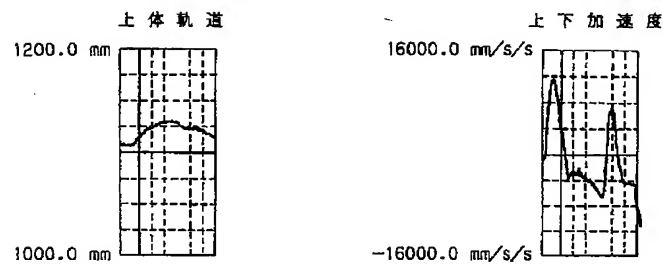
【図15】



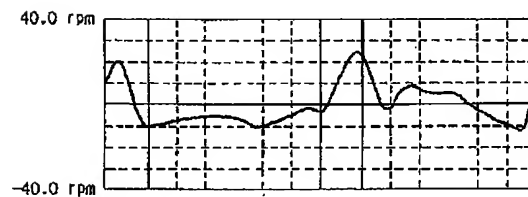
【図17】



【図16】



【図29】

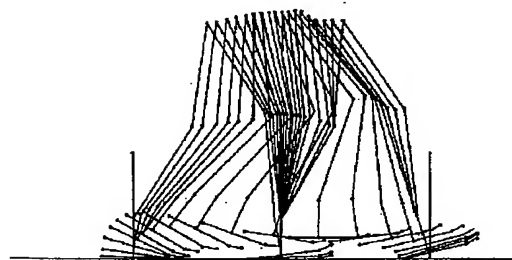


【図21】

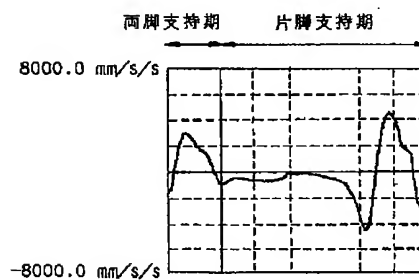
かかと部を上げる角度の計算例

L1 [mm]	400.00	[mm]
L2 [mm]	400.00	[mm]
LT [mm]	150.00	[mm]
LA [mm]	140.00	[mm]
ST [mm]	500.00	[mm]
PS [%]	20.00	[%]
L [mm]	800.00	[mm]
LD [mm]	100.00	[mm]
LS [mm]	200.00	[mm]
LH [mm]	914.60	[mm]
LP [mm]	150.00	[mm]
thC [deg]	80.69	[deg]
thA [deg]	43.03	[deg]
LB [mm]	205.18	[mm]
LX [mm]	926.82	[mm]
thB [deg]	46.65	[deg]
thHmin [deg]	9.64	[deg]
thHmax [deg]	56.29	[deg]
thH [deg]	32.96	[deg]

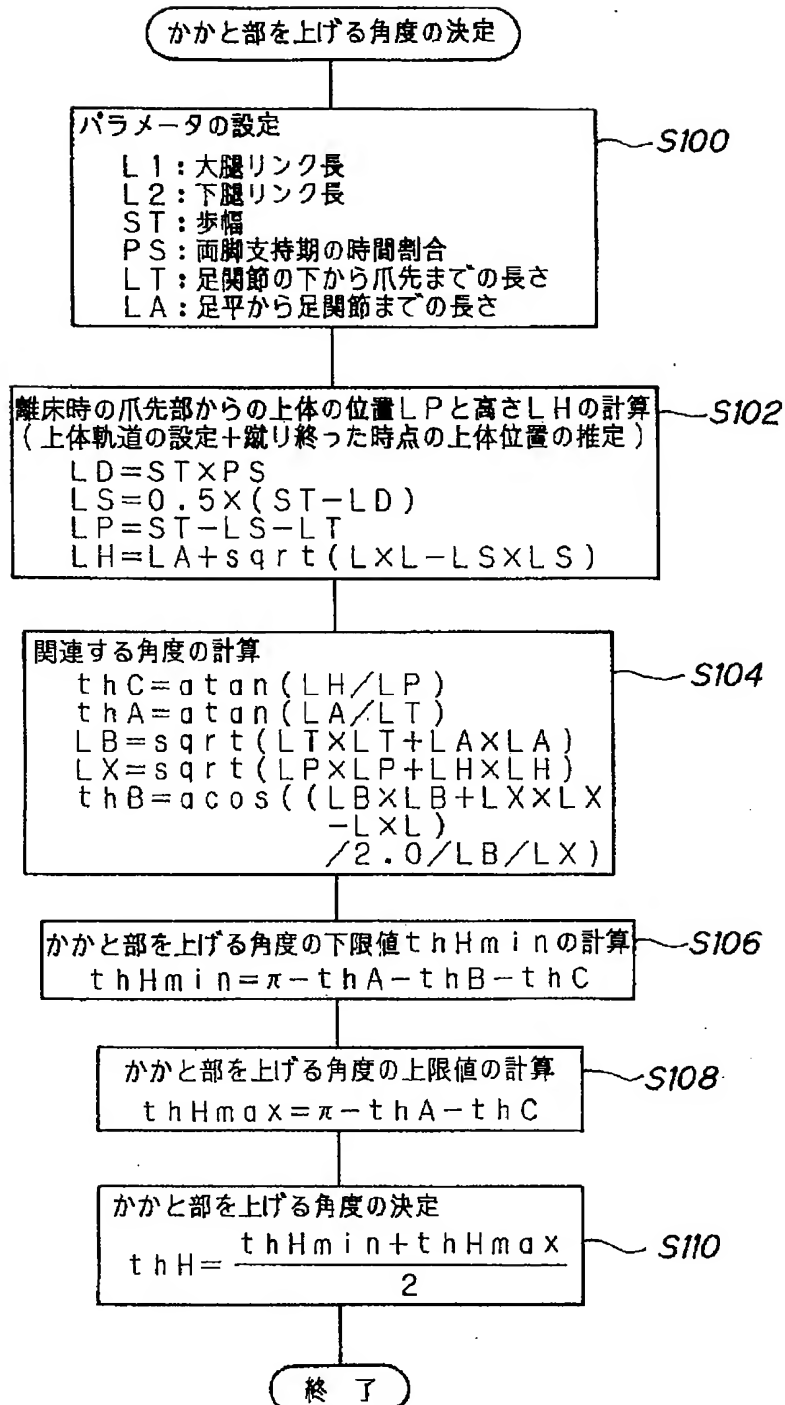
【図23】



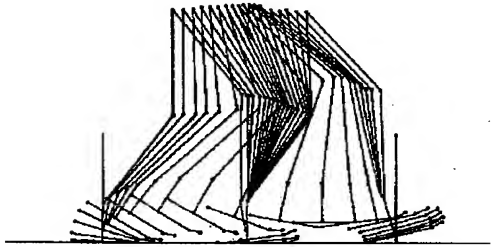
【図25】



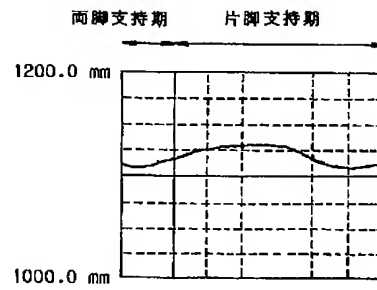
【図22】



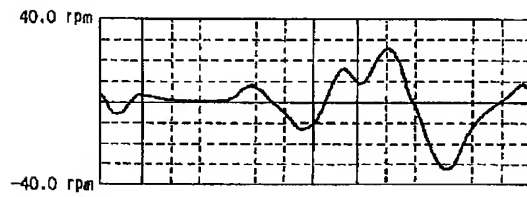
【図26】



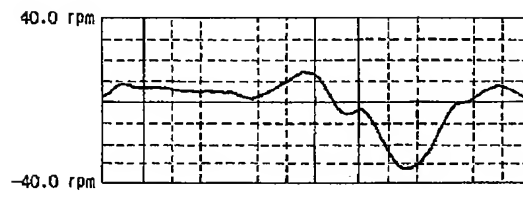
【図27】



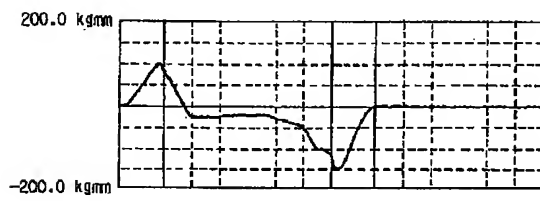
【図30】



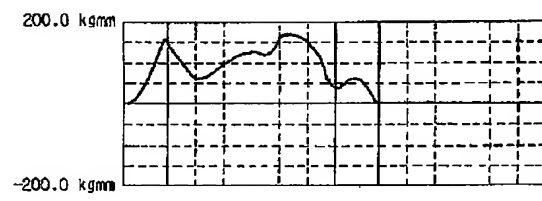
【図31】



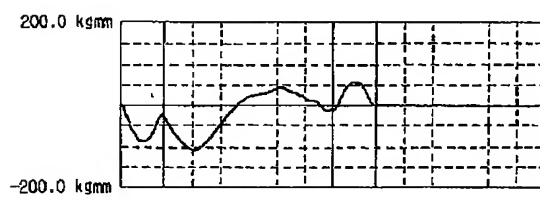
【図32】



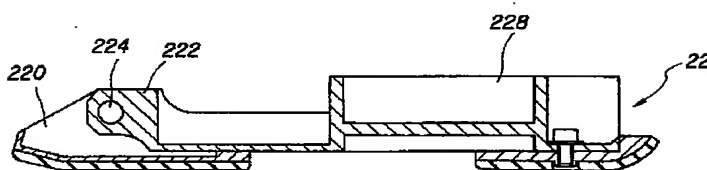
【図33】



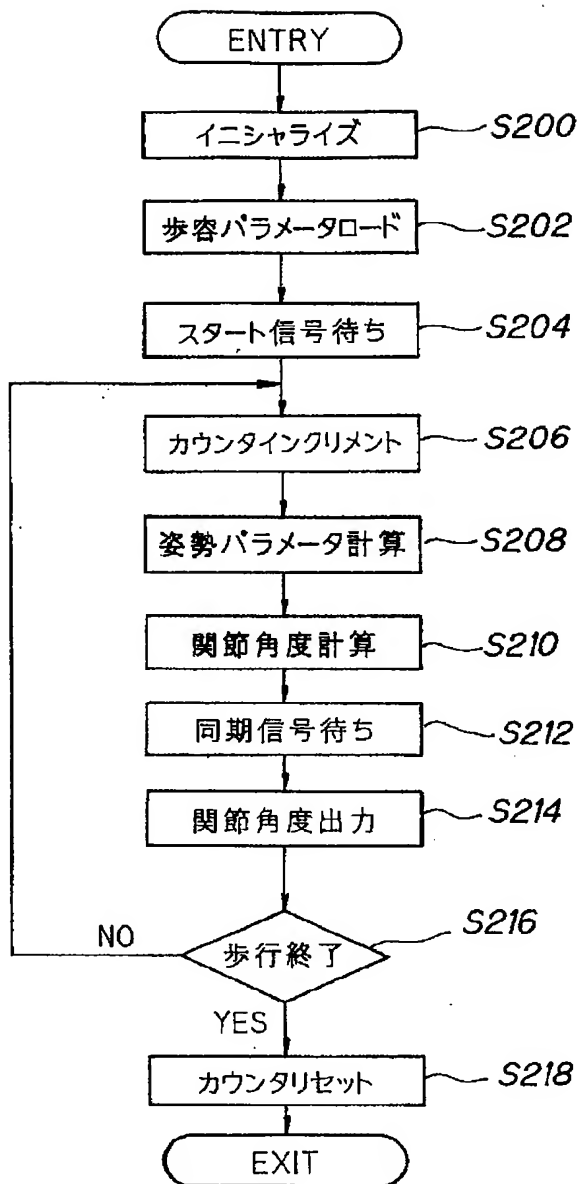
【図34】



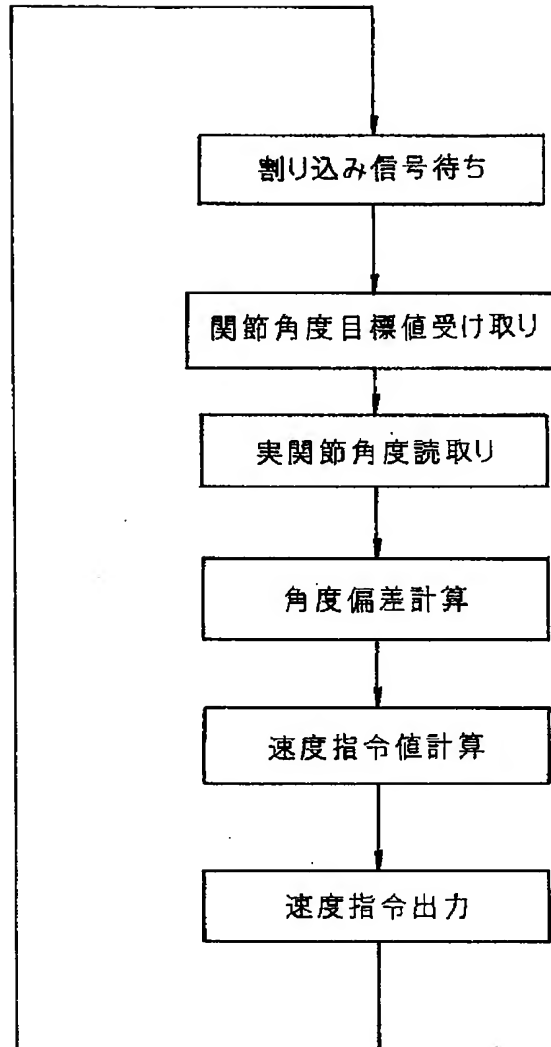
【図38】



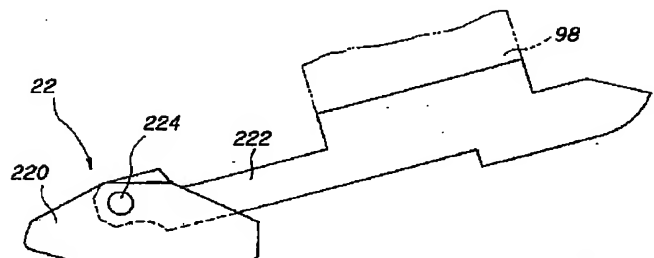
【図35】



【図36】



【図39】



【図 37】

